



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE – UFS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE ARACAJU/SE

FRAÍSE MOREIRA PASSOS

SÃO CRISTÓVÃO, 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE – UFS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE ARACAJU/SE

Trabalho final apresentado ao
Departamento de Engenharia Ambiental
da Universidade Federal de Sergipe,
como parte integrante dos requisitos
para obtenção de título de Bacharel em
Engenharia Ambiental e Sanitária.

JOSÉ JAILTON MARQUES
Orientador

FRAÍSE MOREIRA PASSOS

SÃO CRISTÓVÃO, 2019

FRAÍSE MOREIRA PASSOS

ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE ARACAJU/SE

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido e aprovado pela banca examinadora e pelo Departamento de Engenharia Ambiental (DEAM) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), em 01 de Abril de 2019, como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Jailton Marques - Orientador
Universidade Federal de Sergipe – CCET/DEAM

Prof. Dr. Bruno Santos Souza
Universidade Federal de Sergipe – CCET/DEAM

Prof. Dr^a Inaura Carolina Carneiro da Rocha
Universidade Federal de Sergipe – CCET/DEAM

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à Deus, por sempre estar do meu lado me dando força e coragem. À minha mãe, meu maior exemplo, por todo apoio dado e por fazer de tudo nesses anos de luta para que meus objetivos fossem alcançados. Essa vitória é nossa!

Aos meus tios Ana e Vitor, por depositarem confiança em mim, e por toda ajuda oferecida em todos esses anos e a meu irmãozinho Bruno, por sempre me alegrar em todos os momentos.

À minha grande amiga Marianne por toda a convivência e aprendizado compartilhado desde o início do curso. À tia Joseane pelas palavras de conforto e sabedoria. À minha amiga Camila por toda trajetória vivida e por todo companheirismo. À minha prima Carla, por todos os conselhos dados.

Agradeço também a Nany e tia Matilde, que viram de perto todas as minhas aflições e conquistas. Às minhas queridas Ju e Nicinha que me acolheram por um bom tempo, tendo a oportunidade de conviver e aprender muito.

Ao meu amigo João Pedro por não medir esforços na hora de me ajudar.

Ao meu namorado Leonardo, por sempre estar presente e ter me ajudado bastante nessa etapa final do curso.

Enfim, agradeço a todas as pessoas de bem que passaram pela minha vida nesses anos, incluindo meus professores que contribuíram para o meu amadurecimento e crescimento profissional.

RESUMO

O crescimento populacional e a concentração crescente de pessoas em cidades vêm gerando uma problemática bastante preocupante que é o aumento gradativo das pressões ambientais, sobretudo devido à geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). Mesmo com o surgimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela lei 12.305/2010, ainda prevalece no País uma gestão ineficiente e uma cobertura inadequada aos objetivos e metas da Lei, exigindo da sociedade civil e das entidades públicas e privadas a adoção de ações e metas para a melhoria desse cenário. Uma das técnicas que atendem aos requisitos de segurança à população e meio ambiente é a utilização de aterros sanitários como forma de disposição final adequada. No interior destes aterros, a decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos gera o biogás, composto em sua maioria por metano (CH_4), gás esse com elevado potencial de efeito estufa, mas que pode ser aproveitado na geração de energia elétrica. Portanto, este estudo visa avaliar o potencial de aproveitamento energético do biogás gerado a partir dos resíduos sólidos urbanos produzidos pelo município de Aracaju/SE. A avaliação foi feita com base em projeções populacionais e de geração de resíduos, com posterior estimativa da geração de biogás através do *software LandGEM Landfill Gas Emissions Model, versão 3.02*, da Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA). A partir desse dado, estimou-se a conversão de biogás em energia elétrica, comprovando que os resíduos sólidos urbanos de Aracaju possuem um grande potencial de geração, visto que a sua média de geração atingiu o equivalente a 2.382,7 MW.h/mês, o que atenderia cerca de 21.661 residências de médio padrão na Cidade e ainda reduziria as emissões de gases para a atmosfera, minimizando assim os efeitos do aquecimento global e gerando créditos de carbono, por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Palavras-Chave: Aterros Sanitários. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Biogás. Aproveitamento Energético.

ABSTRACT

Population growth and the growing concentration of people in cities have generated a very worrying problem, which is the gradual increase in environmental pressures, mainly due to the generation of urban solid waste (MSW). Even with the emergence of the National Solid Waste Policy, instituted by law 12,305 / 2010, inefficient management and inadequate coverage of the objectives and goals of the Law still prevail in Brazil, requiring civil society and public and private entities to adopt actions and goals for the improvement of this scenario. One of the techniques that meet the population and environmental safety requirements is the use of landfills as an appropriate final disposal. Within these landfills, the decomposition of the organic matter present in the waste generates biogas, composed mostly of methane (CH₄), a gas with a high potential for greenhouse effect, but which can be used in the generation of electric energy. Therefore, this study aims to evaluate the potential of energy utilization of biogas generated from urban solid waste produced by the municipality of Aracaju / SE. The assessment was based on population projections and waste generation, with a subsequent biogas generation estimate using LandGill Landfill Gas Emissions Model version 3.02 software from the American Environmental Protection Agency (EPA). From this data, it was estimated the conversion of biogas into electric energy, proving that the urban solid waste of Aracaju has a great potential of generation, since its average generation reached the equivalent to 2.382,7 MW.h / month , which would serve about 21,661 middle-class residences in the City and reduce greenhouse gas emissions, thereby minimizing the effects of global warming and generating carbon credits through the Clean Development Mechanism (CDM).

Keywords: Sanitary Landfills. Urban Solid Waste (RSU). Biogas. Energy recovery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de hierarquia na Gestão de Resíduos Sólidos.....	15
Figura 2 - Panorama de disposição final dos resíduos sólidos no Brasil em 2016....	20
Figura 3 - Panorama de disposição final dos resíduos sólidos no Brasil em 2017....	21
Figura 4 – Vista parcial de um lixão	22
Figura 5 - Visualização de um aterro em perspectiva	23
Figura 6 - Distribuição de leiras em um pátio de compostagem.....	25
Figura 7 - Matriz Energética Brasileira	26
Figura 8 - Sistema de <i>flares</i> enclausurados	29
Figura 9 - Ciclo do projeto de MDL.....	31
Figura 10 - Etapas do funcionamento de um motor ciclo Otto.....	32
Figura 11 - Esquema da operação em ciclo aberto de uma turbina a gás	33
Figura 12 - Esquema da operação em ciclo fechado de uma turbina a gás.....	33
Figura 13 - Esquema de representação do ciclo a vapor de Rankine	34
Figura 14 - Parâmetros utilizados no software para determinação da geração de CO ₂ e CH ₄	39
Figura 15 - Representação dos dados de período de tempo	39
Figura 16 - Dados de geração de resíduos no software para os cenários moderado, pessimista e otimista, respectivamente.....	39
Figura 17 - Representação dos gases selecionados para levantamento de dados. .	40
Figura 18 - Crescimento da produção de resíduos sólidos urbanos durante 15 anos para o município de Aracaju.....	43
Figura 19 - Evolução da geração de CH ₄ através de RSU do município de Aracaju.	45
Figura 20 - Estimativa da geração de elétrica (MWh/dia).....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor médio da geração <i>per capita</i> dos resíduos sólidos urbanos em Aracaju entre os anos de 2013 a 2017	36
Tabela 2 – Geração per capita adotado por faixa populacional	36
Tabela 3 - Estimativa populacional de Aracaju até o ano de 2034.....	41
Tabela 4 - Estimativa da geração de resíduos sólidos urbanos entre os anos de 2020 à 2034	42
Tabela 5 - Estimativa de produção de metano no período entre 2020 e 2040.....	43
Tabela 6 – Valores de Potência proveniente do biogás	45
Tabela 7 - Valores de Energia Disponível proveniente do biogás	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1.	GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS – DEFINIÇÃO.....	14
3.1.1	Hierarquia na Gestão de Resíduos Sólidos.....	14
3.1.2	Aspectos Legais e Normativos	15
3.1.2.1	Política Nacional de Saneamento Básico	15
3.1.2.2	Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS	16
3.2.	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	17
3.2.1	Definição, Origem e Classificação de resíduos sólidos	17
3.2.2	Gerenciamento de Resíduos Sólidos	19
3.3.	PANORAMA DA DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL	20
3.3.1	Lixões	21
3.3.2	Aterros Sanitários	22
3.3.3	Incineração	24
3.3.4	Compostagem	25
3.4.	POSSIBILIDADE DE INSERÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	26
3.5.	BIOGÁS PROVENIENTE DE ATERROS SANITÁRIOS	27
3.5.1	Sistema para Extração e Tratamento do biogás do Aterro.....	28
3.5.2	Sistema de queima em <i>flares</i>	28
3.5.3	Projetos de MDL em Aterros Sanitários	29
3.6.	POSSIBILIDADES PARA A UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS DO ATERRO	31
3.6.1	Energia Elétrica	31

3.6.2	Energia Térmica	33
4.	METODOLOGIA.....	35
4.1.	Coleta de dados	35
4.2.	Prognóstico dos resíduos sólidos urbanos	36
4.2.2	Projeção de resíduos sólidos	37
4.3.	Estimativa da geração de Biogás	38
4.4.	Potencial de geração de energia elétrica através de aproveitamento de biogás.....	40
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1.	Projeção do crescimento populacional do Município.....	41
5.2.	Prognóstico da geração de resíduos sólidos urbanos no horizonte temporal de 2020 a 2034	42
5.3.	Estimativa da geração de biogás no aterro ao longo de sua vida útil.....	43
5.4.	Estimativa do potencial de geração de energia elétrica ao longo do período economicamente viável para a recuperação de biogás	45
6.	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

O aumento da geração de resíduos sólidos urbanos junto aos processos de urbanização das cidades, cria uma problemática que é bastante discutida atualmente, trazendo grande preocupação em relação aos danos que uma gestão ineficiente pode causar ao meio ambiente e sociedade civil. Com isso, surgiu a lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que veio com o propósito de estabelecer instrumentos e decretar diversas ações e metas, fundamentais para a melhoria dos processos relacionados à logística dos resíduos sólidos no Brasil.

Algumas das ações impostas e que sustenta a ideia de progresso no gerenciamento desses resíduos foi a erradicação dos lixões e, de modo consequente, a implantação de aterros sanitários com boa infraestrutura de operação, sendo estabelecido assim, um prazo até o ano de 2014 para que tal conduta fosse cumprida, que de fato não se sucedeu. O que se percebe é que grande maioria dos municípios brasileiros não dispõe de recursos financeiros suficientes para resolver o problema e se acomodam a esta realidade sem tomar as devidas atitudes voltadas ao destino ambientalmente correto, bem como a falta de consciência e carência de fiscalização nestes locais.

Fica bastante claro que a implementação de técnicas adequadas para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos hoje ainda enfrenta dificuldades, mas sabe-se que os aterros sanitários se mostram uma opção que conseguem atender aos requisitos de segurança à população e meio ambiente, levando em conta sistemas bem administrados e de grande competência, onde são empregados serviços de impermeabilização do solo, coleta e queima dos gases gerados, tratamento dos efluentes líquidos produzidos e diversas outras estratégias que evitam a contaminação provocadas pelos resíduos sólidos urbanos (MONTAGNA, 2013).

Um dos produtos gerados pela decomposição dos resíduos sólidos em aterros sanitários e que vale a pena ser discutido é o biogás, onde o processo de biodegradação da matéria orgânica ocorre em dois estágios: o aeróbio e o anaeróbio, que juntos convertem toda a fração orgânica em gases, como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), amônia (NH_3), hidrogênio (H_2), gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), sendo o metano e o dióxido de carbono os principais constituintes do biogás, e em quantidades variáveis de acordo com o período de funcionamento do aterro (PIÑAS et al., 2016).

O metano é um dos gases que mais contribuem para o efeito estufa e causam também diversos danos à saúde humana, quando aspirado. Estes pontos negativos referentes ao CH₄ gera uma grande discussão de o que pode ser feito para a redução da emissão desse gás na atmosfera e um caminho bem aceito é que esse metano seja extraído e drenado de aterros sanitários e posteriormente seja queimado através de *flares*, em benefício ao controle de gases de efeito estufa e usando-o como fonte de geração de energia (FARIA, 2010).

A geração de energia elétrica através do aproveitamento de biogás produzido em aterros sanitários é considerado um bom projeto no campo das energias renováveis, sendo classificada com uma fonte de energia alternativa que contribui para a minimização dos efeitos do aquecimento global, gerando também o que chamamos de Reduções Certificadas de Emissões, que são certificados que atestam a redução dos Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, por meio do mecanismo de desenvolvimento Limpo (MDL) e que podem ser comercializados com países desenvolvidos que ainda não atingiram as metas de redução.

Apesar de recente no Brasil, essa iniciativa vem sendo bastante defendida desde o ano de 2016 com o surgimento da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), que incentiva a expansão do uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira. Segundo o Ministério de Minas e Energia, o aproveitamento energético do biogás promete aumentar para 18% a produção de bioenergia no país, uma vez que o biogás é considerado um energético estratégico na geração de energia elétrica e térmica, além de permitir que os resíduos sejam dispostos em local ambientalmente adequado.

Assim, este aproveitamento energético empregado para atender a demanda de energia, combina benefícios como o econômico e o ambiental dentro de um sistema de gestão de resíduos sólidos, e por isso este presente estudo buscou estimar o potencial energético dos RSU do município de Aracaju/SE.

2 OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de geração de biogás a partir dos resíduos sólidos urbanos produzidos pelo município de Aracaju-SE, bem como o seu aproveitamento para geração de energia elétrica.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Fazer um apanhado sobre a relevância do aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários;

Fazer prognóstico acerca do crescimento populacional e da produção anual de resíduos sólidos urbanos no município de Aracaju/SE em um horizonte temporal compatível com a vida útil de um suposto aterro sanitário municipal;

Estimar a produção de biogás no período supracitado;

Avaliar o potencial energético do biogás gerado, como fonte de dados para projetos futuros.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS – DEFINIÇÃO

A gestão integrada de resíduos sólidos, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), “é o conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável”.

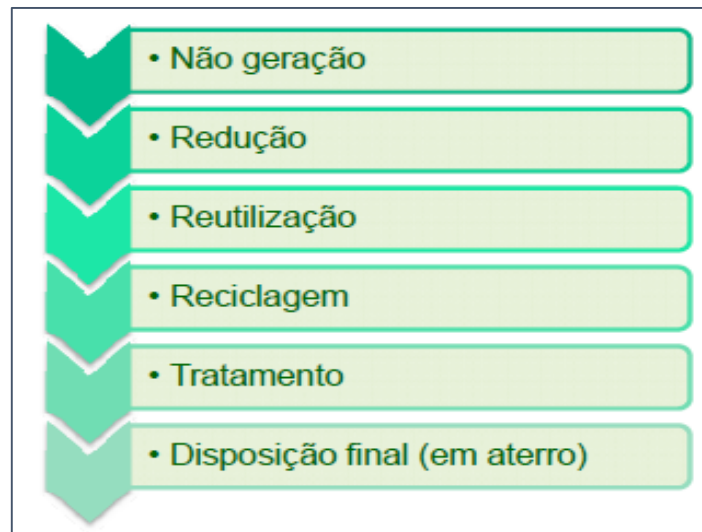
3.1.1 Hierarquia na Gestão de Resíduos Sólidos

Sabe-se que a geração excessiva de resíduos sólidos nos dias de hoje, é uma questão bastante discutida e que provoca uma certa preocupação em relação à promoção de artifícios que venha a solucionar ou minimizar os efeitos nocivos produzidos pela falta de um bom gerenciamento desses resíduos.

Com isso, é necessário elaborar estratégias que visam o aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU), podendo estes serem reciclados ou até mesmo reutilizados e destinados para outras finalidades, para então reduzir a quantidade de resíduos que são direcionados aos aterros sanitários, e aumentar assim a vida útil dos mesmos.

Um dos esquemas defendidos atualmente, que tem uma grande importância no quesito de garantir a melhor forma de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, é a adoção de uma hierarquia (Figura 1) que tem o propósito de facilitar e garantir uma boa administração dos resíduos através de uma ordem prioritária definida.

Tal estratégia é semelhante à Política dos 5R's que indica a preferência pela redução do consumo e reaproveitamento dos materiais, que de acordo com o Ministério do Meio Ambiente é regido pelos seguintes pensamentos: Reduzir; Repensar; Reaproveitar; Reciclar e Recusar consumir produtos que geram impactos socioambientais significativos.

Figura 1 - Esquema de hierarquia na Gestão de Resíduos Sólidos

FONTE: ABETRE (2013).

3.1.2 Aspectos Legais e Normativos

Como forma de complementar os estudos sobre a problemática dos resíduos sólidos no Brasil, discute-se a seguir os principais instrumentos legais pertinentes ao tema, que contribuíram com o avanço da gestão de resíduos e suas particularidades em nível federal.

3.1.2.1 Política Nacional de Saneamento Básico

A Lei Federal nº 11.445/2007 é responsável por estabelecer diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico. De acordo com o Art. 3º, saneamento básico é definido como um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de:

(...)

a) abastecimento de água potável, constituído pelas atividades, pela disponibilização, pela manutenção, pela infraestrutura e pelas instalações necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e os seus instrumentos de medição;

b) esgotamento sanitário, constituído pelas atividades, pela disponibilização e pela manutenção de infraestrutura e das instalações operacionais de coleta, transporte, tratamento e disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até a sua destinação final para a produção de água de reuso ou o seu lançamento final no meio ambiente;

c) limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, constituídos pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final dos resíduos sólidos domiciliares e dos resíduos de limpeza urbanas; e

d) drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, constituídos pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes (BRASIL, 2007, p. 3).

Os serviços públicos de saneamento básico, inclusive as atividades voltadas para a limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos urbanos deverão ser prestados com base nos princípios fundamentais instituídos pela Lei nº 11.445/2007, a saber (alguns deles):

- I- Universalização do acesso;
- II- Integralidade, compreendida com o conjunto de atividades e componentes de cada um dos diversos serviços de saneamento básico, que propicia à população o acesso a conformidade de suas necessidades e maximizando a eficácia das ações e dos resultados;
- III- Controle Social: Conjunto de mecanismos e procedimentos que garantem à sociedade informações, representações técnicas e participações nos processos de formulação de políticas, de planejamento e de avaliação relacionados aos serviços públicos de saneamento básico (BRASIL, 2007).

Ao estabelecer diretrizes nacionais para o setor de saneamento, a Lei de nº 11.445/2007 exige obrigatoriamente a elaboração de Planos Municipais de Saneamento Básico como forma de instrumento eficaz para o planejamento da gestão dos serviços executados (LISBOA; HELLER; SILVEIRA, 2013).

3.1.2.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS

A Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, dispõe sobre:

- (...)
- princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010).

De acordo com o Art. 7º desta Lei, os principais objetivos da Política são:

- I- Proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
- II- Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- III- Estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;
- VII- Gestão integrada de resíduos sólidos;
- XII- Integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (BRASIL, 2010).

Dentre os instrumentos definidos no Art. 8º, da Lei nº 12.305/2010, podem-se citar os seguintes:

- a) Planos de resíduos sólidos: É um documento que fornece informações a respeito da tipologia dos resíduos produzidos nos processos de um dado empreendimento, quantitativo gerado e a sua capacidade de controlar todas as etapas do gerenciamento desses resíduos, como segregação, coleta, armazenamento, transporte, tratamento e destinação final, sendo prova do comprometimento em minimizar os efeitos da geração de resíduos;
- b) Coleta Seletiva: É um processo de coleta de resíduos sólidos recicláveis previamente separados de acordo com sua composição e classificação. Os mesmos podem ser depositados em recipientes de cores distintas para facilitar o processo de triagem realizada pelos catadores posteriormente;
- c) Sistemas de logística reversa: Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada;
- d) Incentivo à criação e ao desenvolvimento de cooperativas e outras formas de associação dos catadores de materiais recicláveis;
- e) Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos –SINIR (BRASIL, 2010).

Com essa Política implementada, todo o resíduo sólido passou a ter reconhecimento social e econômico, visto que, antes de sua disposição final, algumas frações do mesmo podem ser reutilizadas ou recicladas. Sendo assim, houve também o incentivo à inclusão desses catadores, responsáveis pela triagem desse material, como proposta de melhorar as condições de trabalho e renda dessas pessoas (BRASIL, 2010).

3.2. RESÍDUOS SÓLIDOS

3.2.1 Definição, Origem e Classificação de resíduos sólidos

Segundo a Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010, que criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos são definidos como:

(...)
material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010, p.2).

Esses resíduos, de acordo com a NBR 10.004/2004, “resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços, de

varrição e que, em determinado estágio ou processo, não possui mais utilização viável” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Os progressos nos estudos da área ambiental, aditado de uma maior consciência sobre o assunto, possibilitou a identificação das principais interferências provocadas pelos resíduos sobre o meio ambiente, e estabeleceram uma nova definição para os resíduos, antes denominado de “lixo”. O termo, até um pouco obsoleto nos dias de hoje, remete-se a algo que não apresenta valor econômico e muito menos utilidade. Já a forma “resíduos sólidos” é toda sobra de material fruto de um processamento, que por sua vez, pode ser reaproveitado de alguma maneira, apresentam sua relevância financeira e são causadores de estragos ambientais (MOTA E SILVA, 2014).

Conhecer a tipologia e as principais características dos resíduos é de suma importância para a eficiência de sua gestão, sendo necessário também saber que a renda da população, costumes e tradições, nível de escolaridade, clima local e adensamento populacional são fatores que interferem na composição do resíduo gerado. Os resíduos sólidos podem ser formados por substâncias facilmente degradáveis, como a matéria orgânica; moderadamente degradáveis; dificilmente degradáveis; e os não degradáveis (MOTA E SILVA, 2014).

A classificação de resíduos sólidos envolve a constatação da atividade que lhes originou, dos seus constituintes predominantes e o confronto dessas informações diante de relações de resíduos com características já conhecidas, como forma de comparação dos impactos que eles podem causar (ABNT, 2004).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, por intermédio da NBR 10004/2004, classifica os resíduos sólidos de acordo com as suas condições de periculosidade (NEGROMONTE, 2002).

Sendo assim, quanto ao grau de periculosidade, os resíduos podem se enquadrar em dois grupos, os quais são:

a) Resíduos classe I - Perigosos

Esses resíduos podem apresentar algum risco à saúde pública caracterizado pelo aumento de mortalidade ou incidência de doenças ou ao meio ambiente quando manuseados de forma inadequada, já que denotam de propriedades como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;

b) Resíduos classe II – Não perigosos

- Resíduos classe II A – Não inertes

Podem ter propriedades, como inflamabilidade, biodegradabilidade ou solubilidade. Porém, não se agrupam como resíduo classe I ou classe IIB;

- Resíduos classe II B – Inertes

Não têm constituinte algum solubilizado, em concentração superior ao padrão de potabilidade de águas.

3.2.2 Gerenciamento de Resíduos Sólidos

Vivemos hoje em uma sociedade amplamente capitalista, onde o consumismo se tornou um hábito comum pela população, que impulsiona todas as linhas de produção no mercado e que por sua vez tende a gerar uma grande quantidade de resíduos de diversas naturezas.

Com isso, surge uma grande preocupação em respeito aos efeitos dessa geração, atrelado ao desperdício frequente, visto que essa problemática atinge o meio econômico, se considerando novos gastos com extração de matéria-prima, e o meio ambiente, o qual é totalmente agredido em todas as suas esferas (ar, água, solo) através dos vários mecanismos de contaminação (OBLADEN; OBLADEN; BARROS, 2009).

Do ponto de vista da alta demanda de produtos, percebe-se que a produção de resíduos se torna inevitável, o que faz necessário a adoção de práticas e o desenvolvimento de estratégias em prol do gerenciamento desses materiais, como forma de minimizar os impactos que podem ser gerados. Quando possível, ações como redução, reutilização e reciclagem podem ser aplicadas com esse propósito de valorizar as diferentes frações constituintes dos resíduos e propor uma adequada destinação para os mesmos (OBLADEN; OBLADEN; BARROS, 2009).

Sendo assim, é primordial que a redução na fonte seja feita através da incorporação de novas tecnologias aos processos operacionais, estabelecimento de métodos que visem reduzir a demanda por uma determinada matéria-prima, realizando se for preciso, qualquer alteração nas características do produto. Feito isso, pode-se ainda desenvolver condutas de reaproveitamento, onde alguns resíduos possuem até então qualidades que o fazem ser reutilizáveis para uma nova finalidade. Esgotadas as possibilidades, o próximo passo é o encaminhamento correto desses rejeitos para tratamento adequado ou para áreas reservadas e licenciadas para a sua disposição final.

Para tanto, é necessário que ações sejam desenvolvidas visando à redução da geração de resíduo desde a retirada de matéria-prima até a utilização de tecnologias para a economia desses insumos ou até mesmo o seu reaproveitamento dentro do ciclo produtivo.

Portanto, o gerenciamento de resíduos sólidos fica definido pela Lei 12.305/10 como todo um conjunto de:

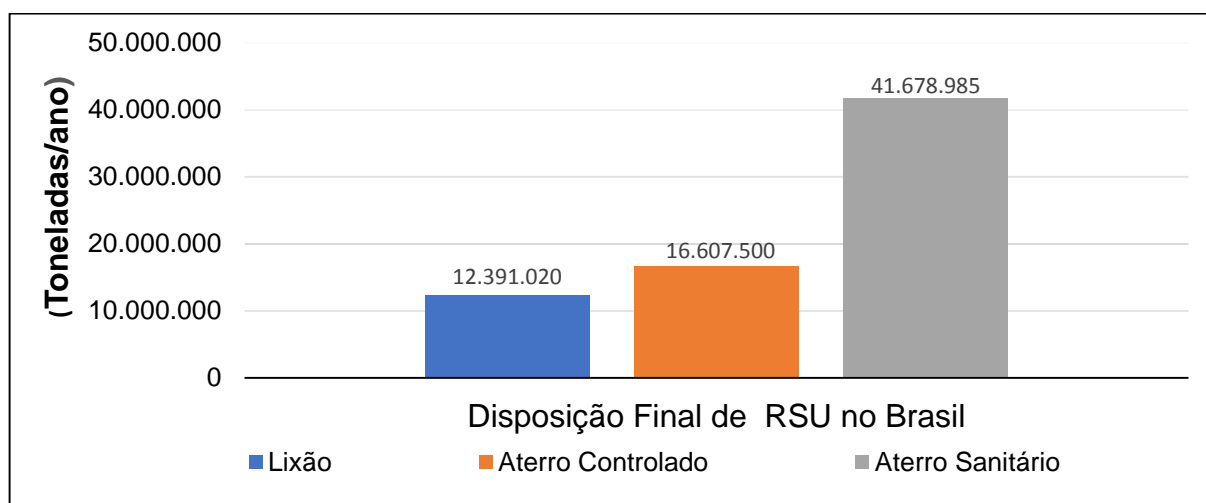
(...)

ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010, p.2).

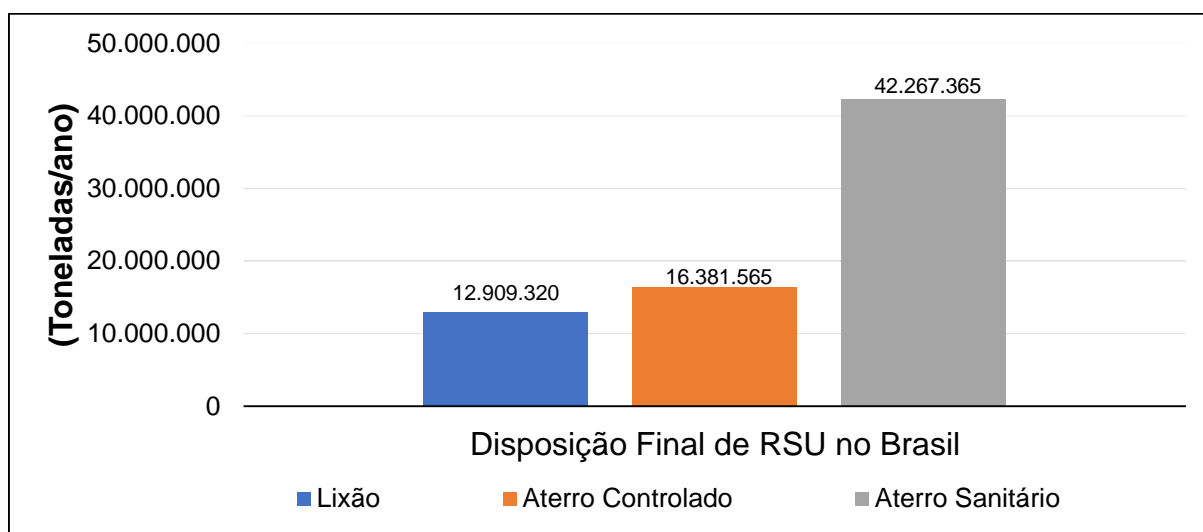
3.3. PANORAMA DA DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL

O Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, referente ao ano de 2017, realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, no tocante à disposição final dos RSU gerados e coletados no país, indicou que houve um significativo progresso quanto à adoção dos aterros sanitários quando comparado com a situação apontada no ano de 2016, no entanto há muito o que se fazer para a erradicação dos lixões (Figura 2 e 3).

Figura 2 - Panorama de disposição final dos resíduos sólidos no Brasil em 2016



FONTE: Próprio autor (2019).

Figura 3 - Panorama de disposição final dos resíduos sólidos no Brasil em 2017

FONTE: Próprio autor (2019).

Analisando os dados dos gráficos, observa-se que, em 2017, 59,1% dos resíduos coletados no país são destinados em aterros sanitários, sendo essa quantidade equivalente a 42,3 milhões de toneladas de RSU. Já o remanescente de cerca de 29 milhões de toneladas de resíduos, correspondente a 40,9% do total de resíduos coletados, são descarregados em lixões e aterros controlados, ou seja, em áreas impróprias para esse despejo, visto que não fazem uso de sistemas e nem de infraestrutura adequada para a promoção de segurança à saúde da população e proteção do meio ambiente.

3.3.1 Lixões

Lixão faz referência a um local inadequado para o despejo de resíduos, onde não existe nenhum suporte para a preservação ambiental e nem tampouco com os riscos à segurança e bem-estar geral da sociedade (LANDIM; AZEVEDO, 2006).

Essas áreas recebem uma grande diversidade de material, onde, inevitavelmente, ocorre uma mistura entre resíduos de diferentes espécies e composição. Por se tratar de um ambiente que não apresenta sistemas de controle de chorume ou coleta de gases, o lixão (Figura 4) se torna um local de proliferação de doenças e causador de inúmeros impactos ambientais. Na maioria dos casos, pode ser que aconteça ainda, a queima irregular desses resíduos, liberando gases tóxicos às pessoas que tem suas vidas totalmente dependentes do recolhimento e triagem de

materiais recicláveis, encontrados numa imensidão de resíduos dispostos incorretamente (ISWA, 2016).

Figura 4 – Vista parcial de um lixão



FONTE: O CIDADÃO (2013) apud MONTAGNA (2013).

É frequente encontrar nesses ambientes pessoas de todas as faixas etárias, que apresentam baixo poder aquisitivo, exercendo a função de catadores como fonte de renda para o sustento da família, e ainda diante de condições insalubres, visto que nos lixões encontram-se vetores de diversas doenças (ELK, 2007).

Há uma comparação feita pela ISWA (2016), que aponta os efeitos negativos da exposição a lixões sobre a saúde da população como sendo de maior proporção do que as implicações da malária.

E isso é um fato que gera muita preocupação em torno do meio ambiente e também em volta dos gastos com o tratamento de enfermidades, que poderiam estar sendo investidos numa melhor gestão de resíduos, na erradicação dos lixões e evitando o surgimento de certas doenças veiculadas à disposição incorreta do lixo.

3.3.2 Aterros Sanitários

Do ponto de vista da NBR 8.419/92, aterro sanitário:

(...)

É uma técnica de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os

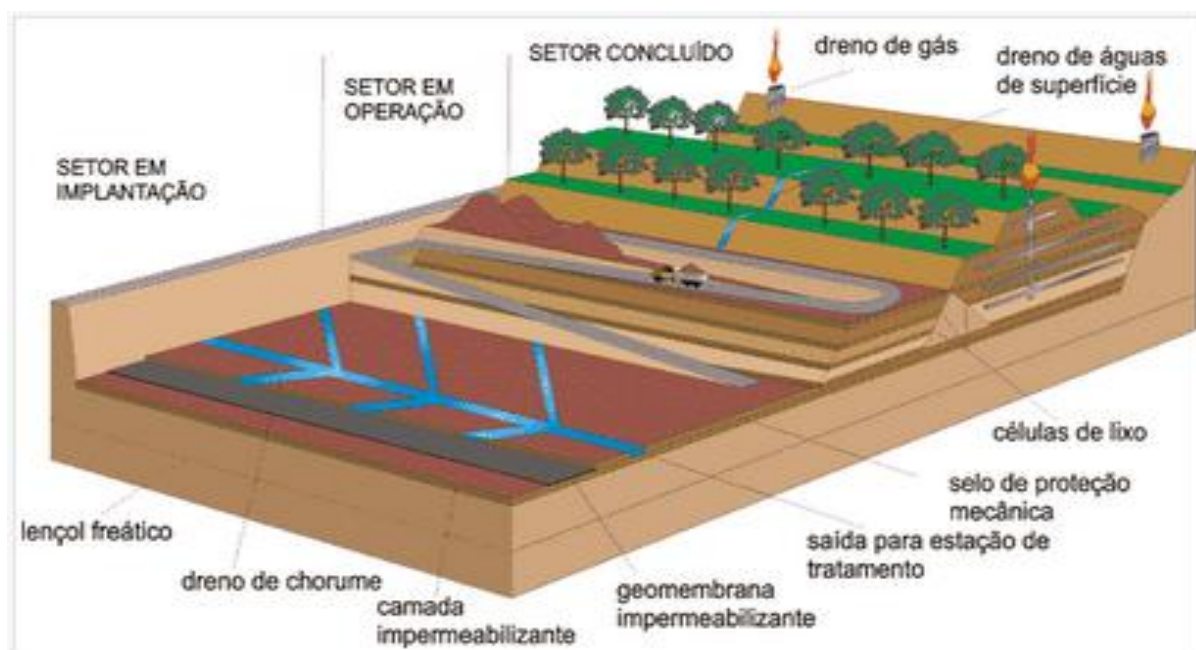
resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT, 1992).

Com o intuito de reduzir os efeitos adversos provocados pelos resíduos, uma equipe com profissionais especializados propõe ideias e elaboram projetos de aterros sanitários, onde, de forma simplificada, opera com cobertura e compactação dos resíduos todos os dias, contando com uma grande área de disposição totalmente impermeabilizada e composta por sistemas de drenos aplicados à coleta e direcionamento ao tratamento adequado dos efluentes gerados, como o chorume produzido pela degradação da matéria orgânica presente nos resíduos.

Devem constar também em tais projetos, um sistema para captação e queima dos gases gerados e elaboração de programas visando o planejamento das ações desenvolvidas na operação do aterro, como também metodologias que deverão ser aplicadas para o monitoramento ambiental e sobre a estrutura geotécnica, como forma de garantir a prevenção de riscos existentes em todos os processos envolvidos.

Vale acentuar que os aterros sanitários (Figura 5), podem ser considerados um modo de destinação final, como também de um sistema de tratamento, e isso pode variar de acordo com o seu projeto e suas características de operação, incluindo processos voltados ao aproveitamento energético, por exemplo (NEGROMONTE, 2002).

Figura 5 - Visualização de um aterro em perspectiva



FONTE: BLOG ATERROS SANITÁRIOS (2006).

Um aterro sanitário conta necessariamente com as seguintes unidades:

- Unidades operacionais:
 - células de lixo domiciliar;
 - células de lixo hospitalar (caso o Município não disponha de processo mais efetivo para dar destino final a esse tipo de lixo);
 - impermeabilização de fundo (obrigatória) e superior (opcional);
 - sistema de coleta e tratamento dos líquidos percolados (chorume);
 - sistema de coleta e queima (ou beneficiamento) do biogás;
 - sistema de drenagem e afastamento das águas pluviais;
 - sistemas de monitoramento ambiental, topográfico e geotécnico;
 - pátio de estocagem de materiais.
- Unidades de apoio:
 - cerca e barreira vegetal;
 - estradas de acesso e de serviço;
 - balança rodoviária e sistema de controle de resíduos;
 - guarita de entrada e prédio administrativo;
 - oficina e borracharia (IBAM, 2001).

3.3.3 Incineração

A incineração é uma forma de destinação de RSU, onde prevalece a combustão de resíduos de uma forma adequada, não ocupando extensas áreas como os aterros sanitários, por exemplo. Contudo, um ponto que deve ser levado em consideração é que o processo de combustão libera alguns gases tóxicos para a atmosfera, o que pode trazer alguns danos à saúde. A emissão de gases poluentes e o seu controle mais severo, por sua vez, acaba gerando alguns custos adicionais que, em sua maioria, encarece essa modalidade de manejo.

Esse processo vem sendo tema de grande interesse no país, já que os aterros sanitários próximos dos centros urbanos estão atingindo sua capacidade máxima de armazenamento e os novos aterros ficam cada vez mais distantes, aumentando o custo de transporte e deposição dos resíduos. Além disto, a possibilidade do aproveitamento da energia térmica do processo para geração de vapor ou energia elétrica torna o projeto mais atrativo do ponto de vista socioeconômico (FIGUEIREDO, 2007).

Desta forma, é possível analisar que o processo de tratamento térmico de resíduos ainda se apresenta inviável do ponto de vista econômico devido ao elevado custo de investimento. Porém, com o desenvolvimento de tecnologias nacionais e as vantagens ambientais que este processo apresenta frente aos destinos finais disponíveis, o tratamento térmico de resíduos se apresenta como uma boa alternativa aos problemas de gestão de resíduos atuais.

3.3.4 Compostagem

Segundo a NBR 13.591/1996, a compostagem refere-se ao processo de decomposição biológica da fração orgânica biodegradável dos resíduos, efetuado por uma população diversificada de organismos em condições controladas de aerobiose e demais parâmetros, desenvolvido em duas etapas distintas: uma de degradação ativa e outra de maturação (BRASIL, 1996).

Essa fração orgânica que é o produto principal do processo de compostagem, pode ser composta por sobras de alimentos em geral, originadas principalmente nas residências, além de folhagens, serragem, entre outros. A decomposição desses resíduos orgânicos acaba sendo facilitada pela presença de micro-organismos, que realizam todo o processo de biodegradação desse material.

Esses resíduos são dispostos em formas de leiras ou pilhas (Figura 6) e submetidos a determinadas condições de temperatura, umidade e aeração para então serem transformados em um composto orgânico conhecido como húmus que é repleto de nutrientes, e sua quantidade produzida depende das características e tipologia do material destinado a compostagem (SANTOS, 2007).

Figura 6 - Distribuição de leiras em um pátio de compostagem



FONTE: REDE DE GESTÃO SUSTENTÁVEL (2013).

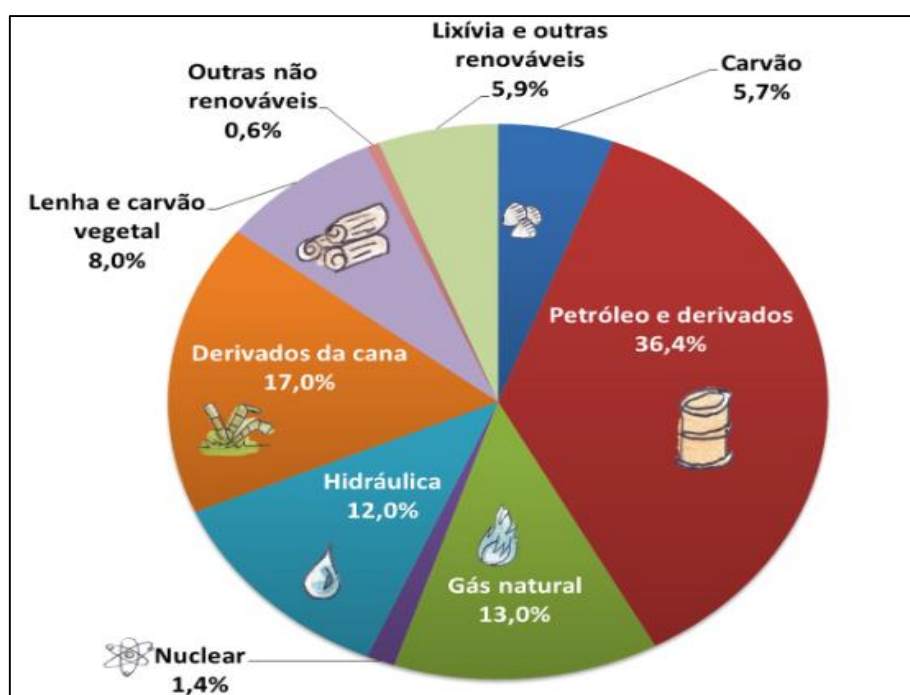
Como resultado disso tem-se a redução do volume de resíduos destinados aos aterros, aumentando assim a sua vida útil e também a formação de um composto que pode ser utilizado como adubo, auxiliando no crescimento e desenvolvimento das plantas.

No Brasil, a compostagem do resíduo é feita por muitas usinas de reciclagem, que separam papéis, metais, plásticos e vidros do lixo orgânico. No entanto, segundo dados do Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos do ano de 2017, o Brasil conta com cerca de 68 usinas de compostagem, sendo que a maior parte delas se encontra nas regiões Sudeste e Sul do País.

3.4. POSSIBILIDADE DE INSERÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2018, com base no ano de 2017 (Figura 7), a matriz energética brasileira é composta em grande quantidade por petróleo e seus derivados (36,4%), carvão mineral (5,7%) e pelo gás natural (13%), somando o equivalente a 55,1% de toda a matriz. Ou seja, as fontes de energia não renováveis ainda lideram a classificação dentro da matriz energética do Brasil.

Figura 7 - Matriz Energética Brasileira



FONTE: BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BEN (2018).

Sabendo disso, nota-se que é necessário incitar o desenvolvimento de novas fontes de energia, visto que tal ação pode minimizar os impactos provocados pelo uso de combustíveis fósseis e manter uma maior diversidade na matriz energética.

Portanto, é importante promover o emprego das energias solar e eólica, como também a utilização do biogás como fonte de energia renovável (FLORES, 2014).

No contexto de fontes alternativas de energia, há uma forte proporção entre o aumento da geração de resíduos sólidos e a grande demanda por energia no País, onde é possível aliar a queima do biogás gerado pela decomposição da matéria orgânica presente nos aterros sanitários em prol de seu aproveitamento energético.

O processo de biodegradação dos resíduos realizado através da ação de bactérias produz esse biogás, que pode ser utilizado como combustível, desde que tenha uma conversão química desse produto em energia útil, que pode ser feita através de um biodigestor, que produz o biogás para alimentar turbinas a gás ou motores de combustão interna, como o motor ciclo Otto. Quando convertida, essa energia contribui na atenuação de implicações ocasionadas pelo efeito estufa, visto que há uma redução do CO₂ equivalente na atmosfera (MARTINS et al., 2015).

Existem ainda muitos empecilhos em relação à utilização do biogás com fonte de energia no Brasil, porém é notório que houve um certo avanço nessas questões, envolvendo a gestão de resíduos sólidos com o surgimento da Lei nº 12.305/2010, que defende a redução de resíduos gerados e o correto manejo dos mesmos. Além de mudar e melhorar a representação energética do país, a queima do biogás reduz de forma considerável os efeitos causados quando o mesmo é eliminado no ar (MARTINS et al., 2015).

3.5. BIOGÁS PROVENIENTE DE ATERROS SANITÁRIOS

Quando dispostos em aterros sanitários, o resíduo sólido urbano, mais especificamente a sua fração orgânica, passa por alguns processos que envolvem reações químicas e biológicas. O tipo e a intensidade dessas reações variam com a proximidade à superfície e com o efeito da presença de oxigênio no local; nesse caso ocorre o que chamamos de oxidação aeróbia, que, por sua vez, produz dióxido de carbono e vapor d'água. Quanto à parte mais interna ou de profundidade maior, na ausência de oxigênio, presume-se uma etapa de digestão anaeróbia (FEAM, 2012).

De acordo com Engebio (2009), “o biogás de aterro contém em torno de 54% de CH₄ e 46% de CO₂, e ainda baixas concentrações de vapor d'água, amônia, gás sulfídrico e outros constituintes”.

3.5.1 Sistema para Extração e Tratamento do biogás do Aterro

Todo o aterro sanitário é composto por um sistema de captação de biogás, que o direciona para um processo de queima através dos chamados *flares* ou para ser reaproveitado como fonte de energia. Porém, antes desse encaminhamento, todo o biogás gerado passa por um sistema de extração que envolve a remoção de particulados e líquidos presentes no gás, podendo estar associado ao próprio sistema de coleta. Para que o procedimento transcorra de forma adequada e eficiente, é necessário a presença de alguns componentes, como: drenos horizontais e verticais, filtros, sopradores e tanques separadores de condensado.

A vazão de biogás na entrada do sistema é regulada por uma válvula borboleta, e todos os drenos são ligados entre pontos de regularização ou também chamados de *manifolds* como forma de manter um melhor monitoramento do fluxo de gás gerado, além de contar com o auxílio de um termômetro para a indicação da temperatura interna da canalização. O processo de extração pode ser realizado sob vácuo, sendo o sistema dotado de dispositivos com a finalidade de manter a vazão do biogás aproximadamente constante durante todo o processo (ICLEI, 2009).

Após a sua extração, o biogás é conduzido para um estágio de tratamento que dispõe de um filtro que tem como função reter todo material particulado arrastado junto com o gás, uma vez que essas impurezas podem afetar o rendimento do processo. Ainda nessa fase, mais especificamente na entrada e saída do filtro, são colocados medidores de pressão com o intuito de quantificar a perda de carga e definir quando o material filtrante utilizado deve ser trocado. Com todo o material particulado removido, o biogás é direcionado a um tanque de separador de líquidos que retira toda a umidade presente nele (ICLEI, 2009).

3.5.2 Sistema de queima em *flares*

Com o propósito de controlar e implementar o monitoramento de todas as etapas do processo, que envolve desde a captação de biogás até a sua queima, muitos aterros sanitários que visam à obtenção de créditos de carbono ou ao aproveitamento energético fazem o uso dos denominados *flares* ou queimadores.

Estes podem ser considerados como abertos ou enclausurados (Figura 8), porém o último é sempre mais recomendado, já que apresenta maior eficiência de combustão e em casos de falha no sistema impedem a liberação de metano para a

atmosfera, o que é de extrema importância ambiental, sabendo-se que é durante a queima em *flares* que ocorre a conversão de metano em dióxido de carbono (CO_2), e de acordo com Cenbio (2010), “o metano é cerca de 20 vezes mais nocivo que o gás carbônico na geração do efeito estufa”.

Figura 8 - Sistema de *flares* enclausurados



FONTE: BTS Tecnologia em Secagem e Combustão Industrial [20-?].

3.5.3 Projetos de MDL em Aterros Sanitários

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo é uma estratégia que foi criada por intermédio do Protocolo de Quioto, que intenciona a melhoria do desempenho sustentável aplicado aos países em desenvolvimento, a partir do uso de tecnologias mais limpas nos diversos processos executados.

Com isso, projetos vêm sendo implantados em países em desenvolvimento, com o propósito de reduzir as emissões de GEE, o que inclui a atenuação de CO_2 na atmosfera e que, por sua vez, gera ao empreendedor ou órgão certificados denominados de Reduções Certificadas de Emissões, mais conhecidos como “créditos de carbono”. Esses certificados podem e devem ser comercializados com os países desenvolvidos que ainda não atingiram as metas de redução, promovendo

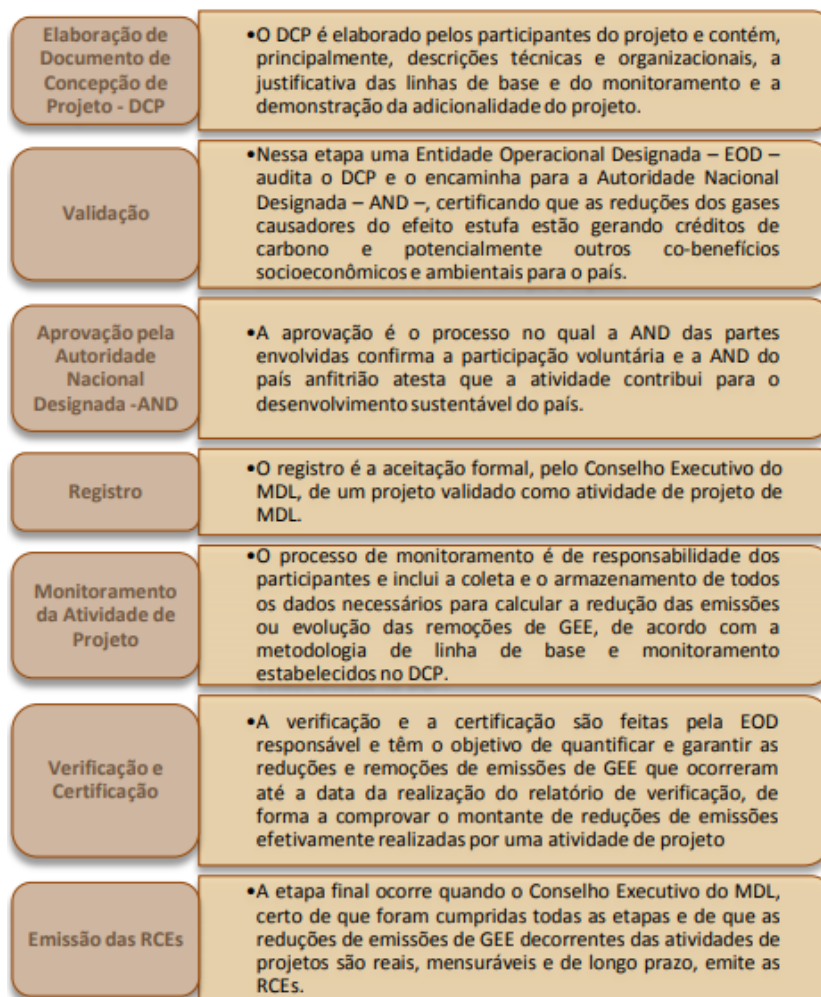
assim a adequação às metas estabelecidas junto à ONU e minimizando os efeitos nocivos ao meio ambiente.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, esse mecanismo deve “implicar em reduções de emissões adicionais àquelas que ocorreriam na ausência do projeto, garantindo benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo para a mitigação da mudança do clima”.

A partir desse ponto de vista, é possível obter créditos de carbono através de projetos de aproveitamento energético em aterros sanitários, onde parte dos gases gerados pela decomposição dos resíduos dispostos, em especial o metano, que seria lançado na atmosfera, é transformado em gás carbônico (FEAM, 2012).

Com isso, o uso dessas certificações pode até servir como financiamento de sistemas de aproveitamento energético, sabendo que os investimentos serão retornados em energia elétrica, suprimindo os processos do próprio aterro, e também na obtenção de créditos de carbono, o que não deixa de ser um capital bem aplicado. Portanto, o MDL auxilia no aumento de projetos que fazem uso de energia limpa e ainda fornece aparatos suficientes para o progresso de novas tecnologias, que propiciam uma maior diversificação da matriz energética (FIGUEIREDO, 2011).

Como forma de incentivo, o Ministério do Meio Ambiente em conjunto com o Ministério das Cidades desenvolveram um projeto que visa a aplicação do MDL na gestão dos Aterros de Resíduos Sólidos (Figura 9), onde agentes da área são treinados e informados a respeito da criação de planos de gestão de resíduos sólidos associados às iniciativas sustentáveis em suas plantas.

Figura 9 - Ciclo do projeto de MDL

FONTE: FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (2012).

3.6. POSSIBILIDADES PARA A UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS DO ATERRO

3.6.1 Energia Elétrica

A geração de energia elétrica através do biogás de aterros sanitários é uma ótima opção de investimento sustentável, uma vez que se apresenta como uma fonte de baixo custo, sabendo que todos os resíduos devem passar por um tratamento adequado e ter uma disposição final correta, sem contar que, fazendo o uso desse biogás para esse fim, o empreendimento estará reduzindo as emissões de gases tóxicos, responsáveis pelo efeito estufa, e desenvolvendo incentivos e ações que valorizam boas práticas em prol do meio ambiente (TANAKA; LACERDA, 2015).

O biogás é formado por algumas moléculas químicas que, para a geração de eletricidade devem ser convertidas em energia mecânica, através de uma queima

regulada, utilizando-se máquinas recuperadoras de energia térmica, a qual pode ser facilmente convertida em energia elétrica.

Sabe-se que existem no mercado alguns dispositivos que realizam esse processo de conversão de energias. Os mais conhecidos são os motores ciclo OTTO e microturbinas a gás.

O motor ciclo Otto é o equipamento de maior utilização no processo de combustão de biogás, visto que ele é mais barato e apresenta um rendimento elétrico superior ao de outras tecnologias. Também conhecido como motor de combustão interna ou motor a explosão, o motor do ciclo Otto tem seu funcionamento baseado em quatro estágios (Figura 10) compreendendo as etapas de admissão, compressão, explosão e exaustão (ICLEI, 2009).

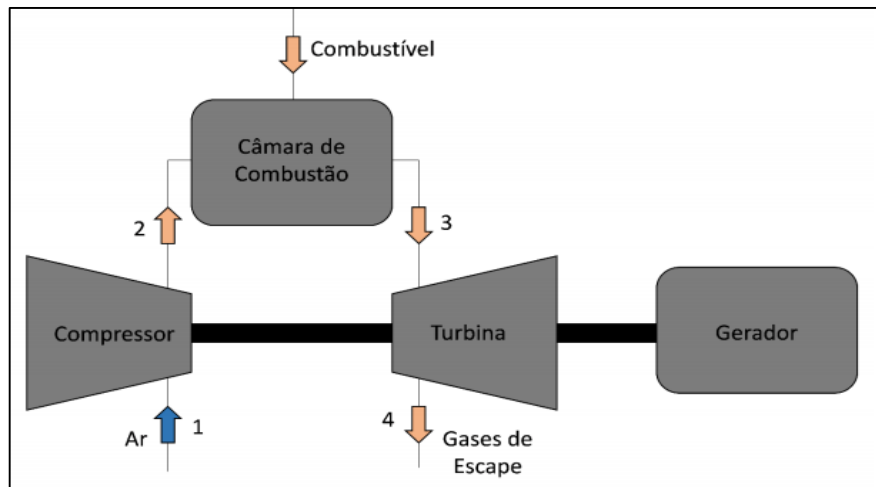
Figura 10 - Etapas do funcionamento de um motor ciclo Otto



FONTE: BERTULANI (2002) apud ICLEI (2009).

Têm-se também as chamadas turbinas a gás, que podem operar em ciclo aberto e fechado. Quando o ciclo é do modo aberto (Figura 11), o gás passa por um processo de compressão, que faz com a pressão interna seja elevada. Sabendo-se que o processo ocorre em regime adiabático, esse trabalho de compressão faz com que a temperatura a essas condições aumente. Após essa etapa, o fluido entra em contato com o combustível dentro de uma câmara de combustão, dando início à sua queima. Logo, o produto decorrente da combustão, irá expandir na turbina em vista da alta temperatura do ambiente, gerando assim energia mecânica.

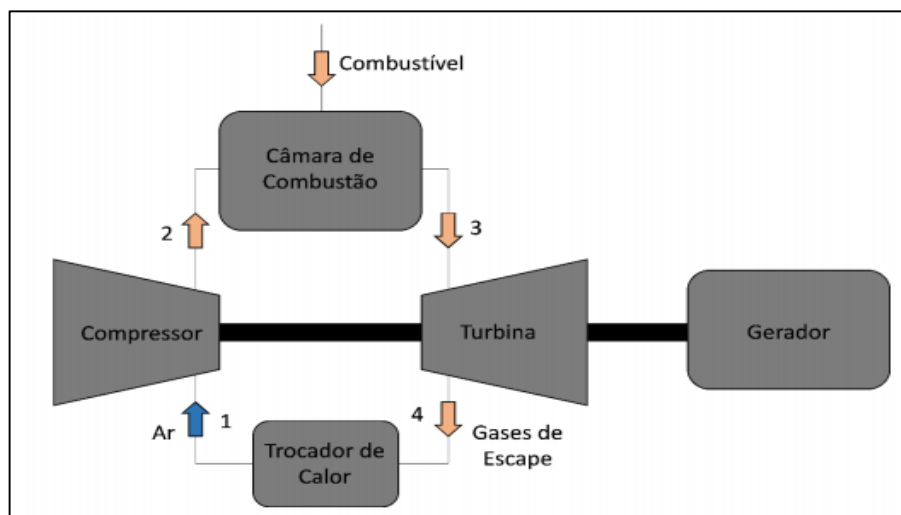
Figura 11 - Esquema da operação em ciclo aberto de uma turbina a gás



FONTE: TANAKA e LACERDA (2015).

A diferença para o ciclo fechado (Figura 12), é que o gás gerado que sai pela turbina é realocado novamente ao processo, passando por um trocador de calor, onde o mesmo é resfriado e retorna a etapa inicial no compressor. Essa redução de temperatura permite o aumento da eficiência do sistema.

Figura 12 - Esquema da operação em ciclo fechado de uma turbina a gás



FONTE: TANAKA e LACERDA (2015).

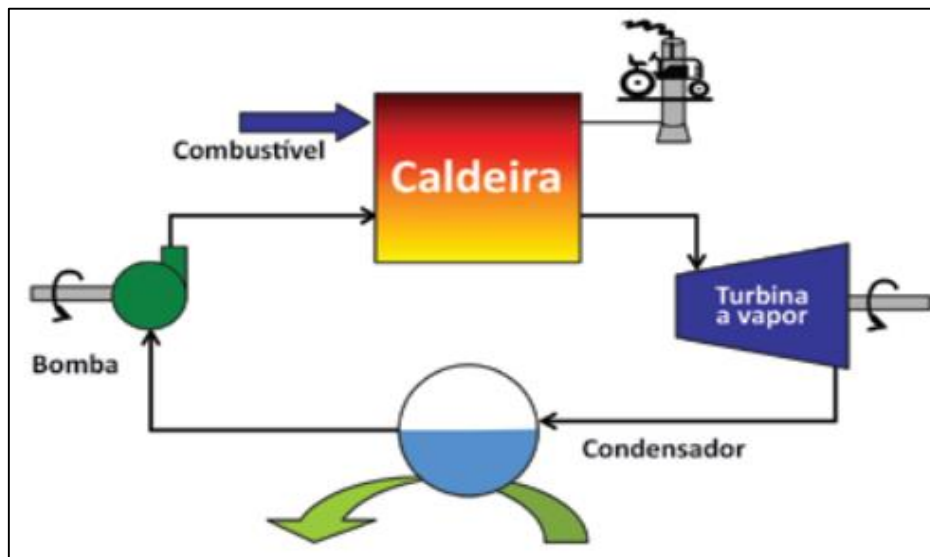
3.6.2 Energia Térmica

Há também a possibilidade de geração de energia térmica e uma das formas de obtê-la é através de tecnologias como o ciclo a vapor de Rankine (Figura 13), que emprega o calor obtido através da combustão do biogás de aterro na geração de vapor

em uma caldeira, o qual gera energia por meio de turbinas interligadas a geradores elétricos.

Vale ressaltar que, por conta da facilidade que o calor tem de se dissipar, as unidades que visam à utilização de energia térmica, devem ser alocadas próximas aos pontos de geração desse vapor, para a minimização de perdas e maior eficiência.

Figura 13 - Esquema de representação do ciclo a vapor de Rankine



FONTE: HIRANI e MANAMI (2007) apud ICLEI (2009).

4. METODOLOGIA

Para a análise da geração de energia elétrica da conversão do biogás, considerou-se um aterro sanitário municipal hipotético em Aracaju e adotou-se o ano de 2020 como o de início das atividades do referido aterro, estimando-se sua produção de biogás durante um período de 15 anos.

4.1. Coleta de dados

Primeiramente, foi necessário conhecer a situação atual dos resíduos sólidos urbanos gerados no município de Aracaju (SE), levando em conta os de maior significância para este estudo, que seriam os resíduos domiciliares e os de limpeza urbana. Para isso, foi feito um levantamento do quantitativo gerado no momento e sua caracterização.

Sabe-se que, para a realização de diversos estudos, é essencial que se conheça a composição dos resíduos gerados nas principais atividades da região. Nesse caso, com base em uma pesquisa de amostragem desenvolvida pela Empresa Municipal de Serviços Urbanos (EMSURB) no ano de 2008, pode-se avaliar a composição gravimétrica dos resíduos coletados no município e identificar quais as frações mais significantes. Sendo assim, estimou-se que cerca de 50,6% dos resíduos coletados em Aracaju referem-se à matéria orgânica e 33,2% são materiais recicláveis (PMA,2017).

Segundo o IPEA (2012), o Brasil apresenta um percentual de 51,4% de matéria orgânica e 31,9 de materiais recicláveis, o que mostra uma certa proximidade entre os dados verificados e apontados no âmbito municipal, indicando que as características do local de estudo se assemelham com a nacional.

De acordo com a estimativa de população dos municípios e para as unidades da federação brasileira, realizada pelo IBGE e publicada em agosto de 2017, a população de Aracaju era de 650.106 habitantes. Conforme informações fornecidas pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), em 2017, a geração *per capita*, ou seja, a quantidade diária de resíduos gerados por habitante era de 0,92 kg/hab.dia, correspondendo a uma geração de resíduos de 218.305,60 toneladas/ano.

Vale destacar que os resíduos sólidos urbanos engloba também a parcela referente aos serviços de limpeza urbana, resíduos esses gerados a partir da limpeza

de logradouros, varrição, capinação, limpeza de feiras e praias, que, segundo a EMSURB (2015), gerou, em média, 17.658,60 toneladas no ano de 2014, correspondendo assim a 7,9% do total de resíduos gerados (PMA, 2017).

O SNIS dispõe de dados como a geração *per capita* dos anos de (2013; 2014; 2015; 2016; 2017), os quais constam na Tabela 1, sendo eles utilizados como base para o cálculo da média dessa geração, para a estimativa da produção total dos resíduos sólidos urbanos do município de Aracaju/SE.

Tabela 1 - Valor médio da geração *per capita* dos resíduos sólidos urbanos em Aracaju entre os anos de 2013 a 2017

ANO	POPULAÇÃO (hab)	RSU (ton/ano)	GERAÇÃO PER CAPITA (kg/hab.dia)
2013	609033	204.513,28	0,92
2014	622211	243.004,51	1,07
2015	635674	227.380,59	0,98
2016	649429	222.819,09	0,94
2017	663481	222.796,92	0,92
MÉDIA			0,97

FONTE: SNIS (2013; 2014; 2015; 2016; 2017) e dados do IBGE.

O resultado da média dos cinco anos supracitados foi igual a 0,97 kg/ (hab.dia), o que evidencia a semelhança com o valor de geração *per capita* definido para regiões que apresentam população entre 500 mil a 5 milhões (Tabela 2).

Tabela 2 – Geração per capita adotado por faixa populacional

Tamanho da cidade	População urbana (habitantes)	Geração per capita (kg.hab ⁻¹ .d ⁻¹)
Pequena	Até 30 mil	0,50
Média	De 30 mil a 500 mil	De 0,50 a 0,80
Grande	De 500 mil a 5 milhões	De 0,80 a 1,00
Megalópole	Acima de 5 milhões	Acima de 1,00

FONTE: MONTEIRO *et al.* (2001) apud MELLO (2014).

4.2. Prognóstico dos resíduos sólidos urbanos

Para a projeção populacional da cidade de Aracaju no horizonte de 2020 a 2034, utilizou-se o método de projeção geométrica, aplicado em uma planilha

desenvolvida pelo Ministério do Meio Ambiente, que é utilizada em um dos cursos ministrados pelo órgão. Os cálculos computados na planilha supracitada é baseado nos dados dos censos demográficos dos anos de 1960, 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010, realizados e publicados pelo IBGE.

Ao fornecer esses dados, foi possível obter uma estimativa de população do município de Aracaju durante os 15 anos definidos, desde o ano de 2020, ano de provável abertura de um suposto aterro, até o ano de 2034. Essa situação hipotética foi necessária como forma de ponderar e avaliar o crescimento populacional da cidade e da geração de resíduos sólidos urbanos nesses anos, bem como seu potencial de produção de biogás, fazendo-se um prognóstico que pode ser utilizado como base para a implantação de um sistema de aproveitamento energético no Município.

4.2.2 Projeção de resíduos sólidos

Foi realizado o prognóstico da geração de resíduos sólidos urbanos para diferentes cenários, adotando os seguintes critérios:

- **Cenário Pessimista:** Usou-se a taxa média de geração anual *per capita* acrescida de 1% a cada ano, variando de 0,97 kg/(hab.d) à 1,12 kg/(hab.d) em 15 anos;
- **Cenário Moderado:** Usou-se a taxa média de geração anual *per capita* encontrado de valor 0,97 kg/(hab.dia), sem variações ao longo dos anos. As mudanças são previstas pelo crescimento populacional.
- **Cenário Otimista:** Usa a taxa média de geração anual *per capita* com reduções de 1% a cada ano, sendo reduzida de 0,97 kg/(hab.dia) à 0,83 kg/(hab.dia). Considerando-se que venha a surgir programas voltados para a educação ambiental e que ocorra mudanças significativas nos hábitos da população, em relação ao consumismo.

4.3. Estimativa da geração de Biogás

Para a realização dessa estimativa foi utilizado o software *LandGEM Landfill Gas Emissions Model*, versão 3.02, da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA).

O *LandGEM* é um modelo matemático fundamentado na equação da taxa de decomposição segundo a cinética de primeira ordem (Equação 1), que, de forma simples, consegue estimar os valores de emissões de gases gerados em aterros sanitários, com base na decomposição da matéria orgânica presente.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-k t_{ij}}$$

(Equação 1)

Onde:

Q_{CH_4} = Geração anual de metano por ano calculado ($m^3_{CH_4}/ano$);

$i = 1$ – Acréscimo por ano;

n = Ano do cálculo (ano inicial de abertura do aterro);

$j = 0,1$ – Acréscimo por ano;

k = Taxa de geração de metano (ano^{-1});

L_0 = Potencial de geração de metano (m^3/Mg);

M_i = Massa de resíduos despejadas no ano em cada seção (Mg)

t_{ij} = Ano, em cada seção, de recebimento da massa de resíduos (tempo, com precisão de decimais; por exemplo, 3,2 anos);

As referências desse modelo e parâmetros adotados (Figura 14) são baseadas em dados reais de aterros nos Estados Unidos, contudo, para a escolha destes, levou-se em consideração algumas condições locais. O valor de L_0 adotado foi de 170 (m^3/Mg), visto que o mesmo é recomendado para regiões que apresentam uma precipitação média anual maior que 635 mm, e a nossa área de estudo conta com uma precipitação de 1409 mm/ano. O valor de k adotado foi de $0,05\text{ ano}^{-1}$, valor este, estipulado para aterros convencionais.

Figura 14 - Parâmetros utilizados no software para determinação da geração de CO₂ e CH₄

Methane Generation Rate, k (year⁻¹)
CAA Conventional - 0.05
Potential Methane Generation Capacity, L_o (m³/Mg)
CAA Conventional - 170
NMOC Concentration (ppmv as hexane)
CAA - 4,000
Methane Content (% by volume)
CAA - 50% by volume

FONTE: EPA (2005).

Esse modelo faz o uso de alguns dados que caracterizam a situação que pretende investigar, como o tempo que a fração orgânica permanecerá confinada no solo (Figura 15), a população, a quantidade de resíduos gerados em cada intervalo de tempo avaliados em três cenários diferentes (Figura 16) e a seleção dos gases que se deseja quantificar (Figura 17).

Figura 15 - Representação dos dados de período de tempo

Landfill Open Year	2020	
Landfill Closure Year	2034	
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No	
Waste Design Capacity	megagrams	

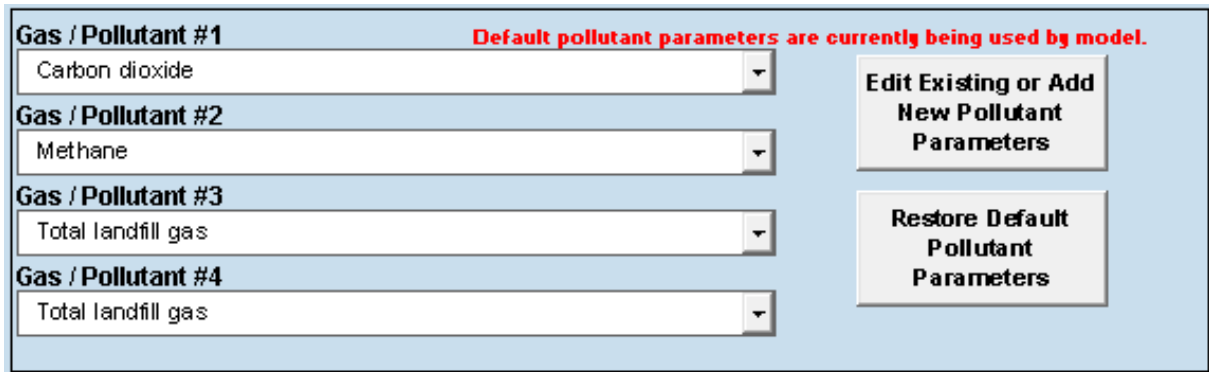
FONTE: EPA (2005).

Figura 16 - Dados de geração de resíduos no software para os cenários moderado, pessimista e otimista, respectivamente.

Year	Input Units (Mg/year)	Year	Input Units (Mg/year)	Year	Input Units (Mg/year)
2020	250.487.000	2020	252.991	2020	247.982
2021	255.907.000	2021	261.051	2021	250.815
2022	261.444.000	2022	269.368	2022	253.681
2023	267.101.000	2023	275.637	2023	256.582
2024	272.880.000	2024	284.415	2024	259.518
2025	278.785.000	2025	292.325	2025	262.489
2026	284.817.000	2026	302.728	2026	265.497
2027	290.980.000	2027	315.558	2027	268.512
2028	297.276.000	2028	322.101	2028	271.564
2029	303.709.000	2029	332.201	2029	274.653
2030	310.281.000	2030	342.908	2030	277.781
2031	316.994.000	2031	353.923	2031	280.948
2032	323.854.000	2032	365.253	2032	284.156
2033	330.861.000	2033	376.909	2033	287.406
2034	338.020.000	2034	388.898	2034	290.697

FONTE: EPA (2005).

Figura 17 - Representação dos gases selecionados para levantamento de dados.



Gas / Pollutant #1 Default pollutant parameters are currently being used by model.

Carbon dioxide

Gas / Pollutant #2

Methane

Gas / Pollutant #3

Total landfill gas

Gas / Pollutant #4

Total landfill gas

Edit Existing or Add New Pollutant Parameters

Restore Default Pollutant Parameters

FONTE: EPA (2005).

4.4. Potencial de geração de energia elétrica através de aproveitamento de biogás

Para a estimativa da potência e da geração de energia foram utilizadas as equações (2) e (3), respectivamente.

$$Px = (Qx \times \eta \times PCI / f) \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

Px : potência disponível a cada ano (MW);

Qx : vazão de metano captado ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{h}$);

η : eficiência do gerador (~28%)

PCI : poder calorífico do metano ($5.500 \text{ kcal}/\text{m}^3$);

f : fator de conversão dimensional.

$$E = Px \times Disp \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

E : energia disponível (MWh/dia);

Px : potência disponível (MW);

$Disp$: tempo de operação (24h/dia).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Projeção do crescimento populacional do Município

A projeção estimada para a população de Aracaju do ano de 2020 até 2034, utilizando-se uma projeção com base no método geométrico, pode ser observada pela Tabela 3.

Tabela 3 - Estimativa populacional de Aracaju até o ano de 2034

ANO	POPULAÇÃO (hab)	OBSERVAÇÃO
1960	115.713	Censos Demográficos do IBGE
1970	186.838	
1980	299.422	
1991	401.676	
2000	461.083	
2010	571.149	
2013	609.033	Projeção com base no Método Geométrico
2014	622.211	
2015	635.674	
2016	649.429	
2017	663.481	
2018	677.838	
2019	692.505	
2020	707.489	
2021	722.798	
2022	738.438	
2023	754.416	
2024	770.740	
2025	787.417	
2026	804.455	
2027	821.862	
2028	839.646	
2029	857.814	
2030	876.375	
2031	895.338	
2032	914.711	
2033	934.504	
2034	954.725	

FONTE: Próprio autor (2019).

5.2. Prognóstico da geração de resíduos sólidos urbanos no horizonte temporal de 2020 a 2034

Considerando-se que a cobertura de coleta seja igual a 100% no município, a previsão de quanto que o município irá produzir de resíduos sólidos urbanos durante o período delimitado de estudo, nos três cenários discutidos (Tabela 4) foi feita aplicando os valores de taxa média de geração *per capita* estipulados na Metodologia, específicos para cada situação, com os dados demográficos obtidos através da projeção populacional.

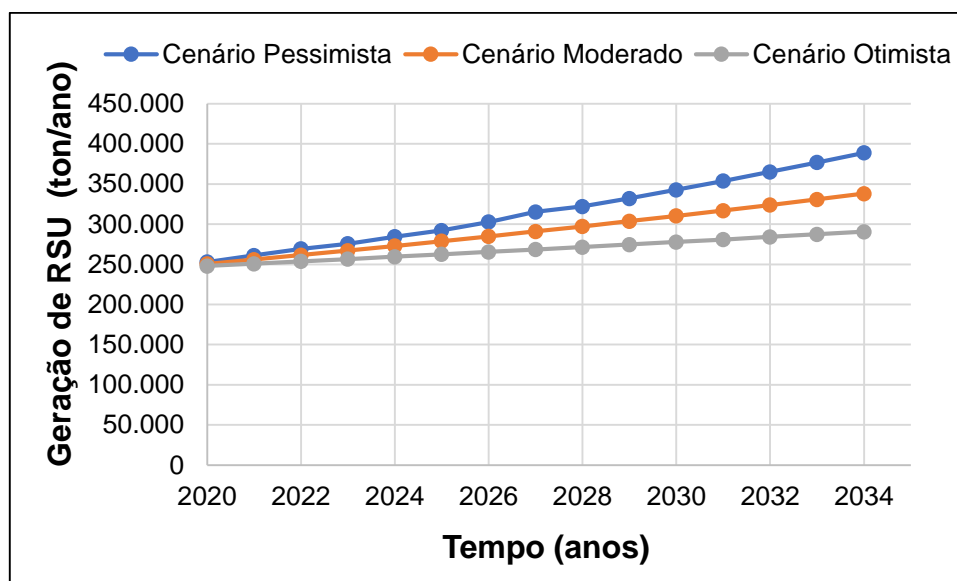
Tabela 4 - Estimativa da geração de resíduos sólidos urbanos entre os anos de 2020 à 2034

Ano	População Total (hab)	Geração anual de resíduos sólidos (ton/ano)		
		Cenário Pessimista	Cenário Moderado	Cenário Otimista
2020	707.489	252.991	250.487	247.982
2021	722.798	261.051	255.907	250.815
2022	738.438	269.368	261.444	253.681
2023	754.416	275.637	267.101	256.582
2024	770.740	284.415	272.880	259.518
2025	787.417	292.325	278.785	262.489
2026	804.455	302.728	284.817	265.497
2027	821.862	312.558	290.980	268.512
2028	839.646	322.101	297.276	271.564
2029	857.814	332.201	303.709	274.653
2030	876.375	342.908	310.281	277.781
2031	895.338	353.923	316.994	280.948
2032	914.711	365.253	323.854	284.156
2033	934.504	376.909	330.861	287.406
2034	954.725	388.898	338.020	290.697

FONTE: Próprio autor (2019).

Com os dados estimados, pode-se analisar o aumento da geração de resíduos através de gráfico (Figura 18). É plausível reforçar que os dados obtidos no prognóstico estão sujeitos a incertezas. Fatores como educação ambiental e boas práticas na gestão dos resíduos poderão ter com resultado a redução desses valores de geração, ao longo desse 15 anos adotados.

Figura 18 - Crescimento da produção de resíduos sólidos urbanos durante 15 anos para o município de Aracaju



FONTE: Próprio Autor (2019).

Conforme foi ilustrado, admitindo-se um aterro sanitário com início de suas atividades previstas para o ano de 2020, a produção anual de resíduos, no cenário moderado, crescerá quase linearmente de 250.487 em 2020 até 338.020 toneladas em 2034. Já no cenário pessimista esse valor chegará à 388.898 toneladas, visto que não ocorrerá nenhum tipo de atividade relacionada às boas práticas na gestão de resíduos sólidos urbanos.

5.3. Estimativa da geração de biogás no aterro ao longo de sua vida útil

A Tabela 5 apresenta as projeções da geração de metano obtidas com o auxílio do *software* LandGEM durante o tempo de operação do aterro hipotético (15 anos) e após o término das atividades, até o ano de 2040.

Tabela 5 - Estimativa de produção de metano no período entre 2020 e 2040

Ano	Emissões de metano (m³/h)		
	Cenário Pessimista	Cenário Moderado	Cenário Otimista
2020	0,00	0	0,00
2021	240,07	237,67	235,27
2022	476,03	468,89	461,76
2023	708,45	694,09	680,02
2024	935,39	913,67	890,30

Cont. Tabela 5 - Estimativa de produção de metano no período entre 2020 e 2040

2025	1.159,82	1.128,03	1.093,04
2026	1.380,14	1.337,53	1.288,81
2027	1.600,46	1.542,54	1.478,31
2028	2.334,47	1.743,40	1.660,96
2029	2.526,26	1.940,44	1.836,76
2030	2.718,04	2.133,97	2.007,99
2031	2.910,96	2.324,30	2.173,52
2032	3.105,02	2.511,71	2.334,47
2033	3.300,23	2.696,50	2.489,73
2034	3.496,58	2.878,92	2.641,55
2035	3.695,21	3.059,24	2.788,81
2036	3.514,84	2.910,04	2.652,97
2037	3.343,61	2.768,11	2.522,83
2038	3.180,37	2.633,11	2.399,54
2039	3.025,11	2.504,69	2.283,11
2040	2.877,85	2.382,54	2.171,23

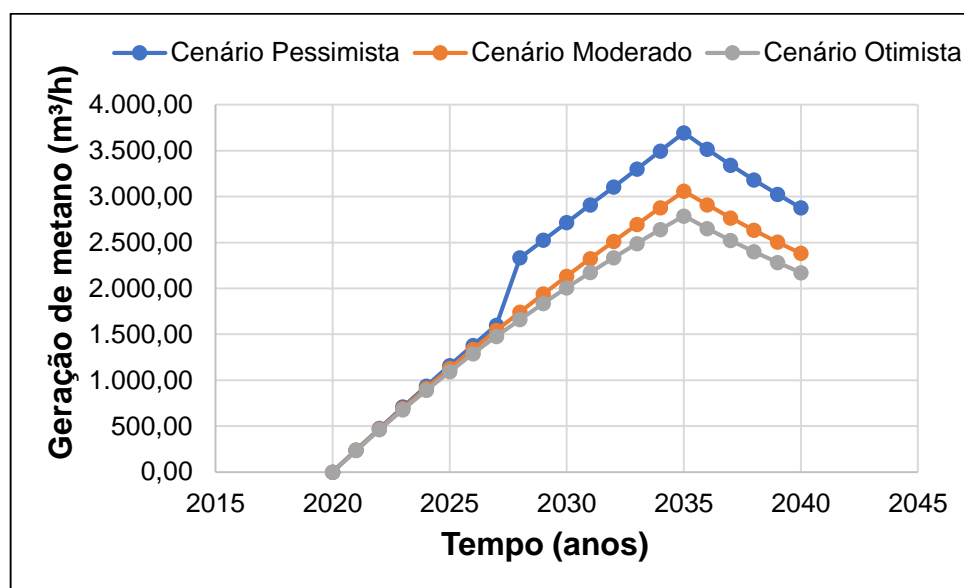
FONTE: Próprio autor (2019).

Sabe-se que a geração de biogás varia com a idade do resíduo, ou seja, resíduos novos depositados continuamente apresentam um maior potencial de produção de metano do que aqueles que estão armazenados e confinados a mais tempo, conforme pode ser observado no estudo.

Como o início das atividades do aterro hipotético é no ano de 2020, percebe-se que, nesse ano, ainda não há geração significativa de biogás, pois é necessário um intervalo de tempo entre a disposição do resíduo e o início da geração dos gases. A formação de biogás se inicia a partir de 2021, com uma produção estimada de 237,67 m³/h de metano, considerando o cenário moderado.

Analisando-se os dados, é possível perceber como é o desempenho da geração de metano durante os anos em que ainda há recebimento de resíduos, comportamento tal que prevalece de forma crescente, devido ao aumento do potencial gerador a cada quantidade de resíduos que é depositada, tudo isso considerando o fator de conversão da matéria orgânica em metano adotado pelo software, que é de 50%.

Com base na Figura 19, observa-se que, em 2035, a curva atinge seu ponto máximo, ou seja, nesse período ocorre a maior produção de metano proveniente dos resíduos dispostos. No ano seguinte, esses valores começam a cair, já que não há mais recebimento de resíduos “novos” para potencializar o sistema.

Figura 19 - Evolução da geração de CH₄ através de RSU do município de Aracaju

FONTE: Próprio autor (2019).

5.4. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica ao longo do período economicamente viável para a recuperação de biogás

Aplicando-se esses resultados nas equações que estima a potência e a energia elétrica geradas, obtêm-se os valores indicados na Tabelas 6 e 7, respectivamente. Observa-se que os valores de potência são bem semelhantes, contudo o cenário otimista apresenta sempre valores inferiores quando comparados com os cenários moderado e pessimista. O cenário pessimista, por exemplo, prevê a geração de até 5,15 MW de potência em 2035.

Tabela 6 – Valores de Potência proveniente do biogás

Ano	Potência (MW)		
	Cenário Pessimista	Cenário Moderado	Cenário Otimista
2020	0,00	0,00	0,00
2021	0,43	0,43	0,42
2022	0,85	0,84	0,83
2023	1,27	1,24	1,22
2024	1,67	1,64	1,59
2025	2,08	2,02	1,96
2026	2,47	2,40	2,31
2027	2,87	2,76	2,65
2028	4,18	3,12	2,97
2029	4,52	3,47	3,29
2030	4,87	3,82	3,60

Cont. Tabela 6 - Valores de Potência proveniente do biogás

2031	5,21	4,16	3,89
2032	5,56	4,50	4,18
2033	5,91	4,83	4,46
2034	6,26	5,16	4,73
2035	6,62	5,48	4,99
2036	6,29	5,21	4,75
2037	5,99	4,96	4,52
2038	5,70	4,72	4,30
2039	5,42	4,49	4,09
2040	5,15	4,27	3,89

FONTE: Próprio Autor (2019)

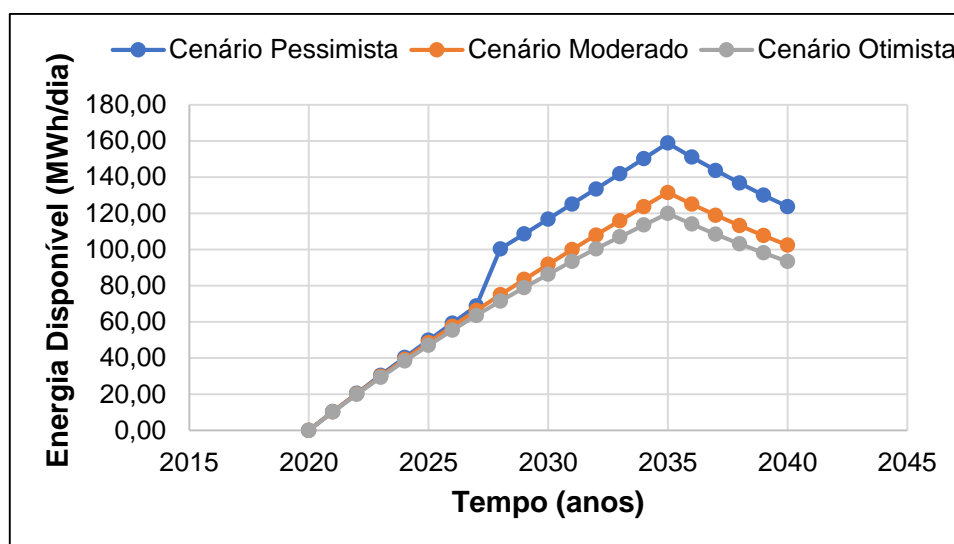
Tabela 7 - Valores de Energia Disponível proveniente do biogás

Ano	Energia Disponível (MWh/dia)		
	Cenário Pessimista	Cenário Moderado	Cenário Otimista
2020	0,00	0,00	0,00
2021	10,32	10,21	10,11
2022	20,46	20,15	19,84
2023	30,45	29,83	29,23
2024	40,20	39,27	38,26
2025	49,85	48,48	46,98
2026	59,31	57,48	55,39
2027	68,78	66,29	63,53
2028	100,33	74,93	71,38
2029	108,57	83,39	78,94
2030	116,81	91,71	86,30
2031	125,10	99,89	93,41
2032	133,44	107,95	100,33
2033	141,83	115,89	107,00
2034	150,27	123,73	113,53
2035	158,81	131,48	119,85
2036	151,06	125,06	114,02
2037	143,70	118,96	108,42
2038	136,68	113,16	103,12
2039	130,01	107,64	98,12
2040	123,68	102,39	93,31

FONTE: Próprio autor (2019).

É natural que os valores de potência e energia estimados acompanham o comportamento da geração de metano. Percebe-se, na Figura 20, que a energia disponível ao longo dos anos passa por um máximo em 2035 para todos os cenários. Em 2036 os valores começam a decaimento, visto que não existiria mais a entrada de fração orgânica, devido ao encerramento das atividades do aterro. O biogás gerado a partir de então seria exclusivamente regido pela taxa de geração de metano a partir da matéria orgânica remanescente, segundo uma cinética de primeira ordem, com constante da taxa k .

Figura 20 - Estimativa da geração de elétrica (MWh/dia)



FONTE: Próprio Autor (2019).

Segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2018, elaborado pela empresa de pesquisa energética (EPE), o estado de Sergipe consome cerca de $1,075 \times 10^6$ MW.h, correspondente a um total de 799.809 residências. Com essas informações, chega-se à conclusão que o consumo médio por residência gira em torno de 1,34 MW.h/ano ou 0,11 MW.h/mês. Assim, o potencial de geração de energia elétrica do biogás oriundo dos resíduos gerados em Aracaju, logo no segundo ano de operação do sistema hipotético de aproveitamento energético, no cenário moderado, é equivalente a 306,3 MW.h/mês, o que abasteceria 2.784 residências no final de 2021.

É visível no cenário pessimista que, em 2035, ano que segue ao encerramento das atividades e onde persiste uma maior quantidade de metano, tem-se a geração de 4.764,3 MW.h/mês, o que forneceria energia para 43.312 residências. Levando-se

em consideração a média de geração de energia dos anos supracitados, no cenário moderado, ter-se-ia o equivalente a 2.382,7 MW.h/mês, que atenderia 21.661 moradias da Capital.

Vale ressaltar que parte da energia útil gerada a partir dos resíduos sólidos urbanos pode ser usada na operação e na manutenção do próprio aterro ou comercializada com empresas ou indústrias que visam ao desenvolvimento sustentável e que apresentam interesse no uso de energias limpas.

O presente estudo confirmou o potencial energético dos resíduos sólidos gerados em Aracaju/SE, e motiva a implantação de projetos semelhantes, com o intuito de manter a energia produzida através do biogás, como uma fonte mais limpa e contínua.

Sabendo-se que a geração de resíduos do município não cessa e, mesmo com o fim da vida útil do aterro, haverá a necessidade de abertura de um novo aterro ou da implantação de outra técnica de tratamento/disposição final com potencial de aproveitamento energético, a exemplo da pirólise ou da incineração, o que manterá o suprimento de energia elétrica a uma parcela da população.

6. CONCLUSÕES

Esta análise mostrou a viabilidade técnica da produção de biogás a partir dos resíduos sólidos urbanos gerados pelo município de Aracaju e do aproveitamento da energia química nele contida através da conversão em energia elétrica.

Os resultados encontrados através do *software* e as estimativas realizadas motivam estudos mais avançados, visto que ainda se fala muito pouco sobre esta prática. Presume-se que a maior dificuldade de inserção do biogás na matriz energética brasileira seja devida aos baixos investimentos na área, já que há custos com geradores e equipamentos próprios para que ocorra a conversão de biogás em energia útil.

Desta forma, o estudo mostrou que, no quesito fornecimento de energia, o biogás proveniente de um aterro sanitário, é uma fonte alternativa bastante relevante, que possui uma tendência de produção considerável para um município do porte de Aracaju. Tal observação e o conhecimento que se buscou sobre a utilização dos resíduos sólidos como fonte de energia teve como objetivo revelar a importância dessa fonte energética para todos os empreendedores interessados, necessitando apenas do desenvolvimento de um estudo de viabilidade econômica para aumentar as chances de sucesso do projeto.

Um exemplo de que o aproveitamento energético proveniente de resíduos sólidos urbanos está dando passos importantes no Brasil foi a instalação de uma usina de geração de energia com resíduos orgânicos no estado do Paraná, que prevê a oferta de cerca de 2,8 MW de energia elétrica e térmica.

Por fim, este trabalho comprovou que o uso dos resíduos sólidos urbanos do município de Aracaju tem um grande potencial de geração de energia, o que é considerado como uma boa alternativa para a redução da dependência pelos combustíveis fósseis e por ainda minimizar os impactos ambientais gerados por outras fontes convencionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. **Panorama de resíduos sólidos no Brasil - 2017**. São Paulo: ABRELPE, 2017. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2017/>. Acesso em: 10 Dez. 2018.

ASSIS, Camila Moreira de. **Avaliação da gestão integrada de resíduos sólidos urbanos em municípios da região metropolitana de Belo Horizonte**. 2012. 381 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520: informação e documentação: citações em documentos**. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: Informação e documentação: Referências**. Rio de Janeiro, 2018.

BRASIL. Consultoria Legislativa. **Legislação sobre Resíduos sólidos: Comparação da Lei 12.305/2010 com a Legislação de países desenvolvidos**. Brasília, 2012. 55 p.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2018: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2018. 62 p.

BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, [2010]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso 07 nov. 2018.

BRASIL. Lei Nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União [2007]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso 08 nov. 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos, 2013. Brasília, 2015. Disponível em: www.snis.gov.br. Acesso em: 02 fev. 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos, 2014. Brasília, 2015. Disponível em: www.snis.gov.br. Acesso em: 02 fev. 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos, 2015. Brasília, 2015. Disponível em: www.snis.gov.br. Acesso em: 02 fev. 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos, 2016. Brasília, 2015. Disponível em: www.snis.gov.br. Acesso em: 02 fev. 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos, 2017. Brasília, 2015. Disponível em: www.snis.gov.br. Acesso em: 02 fev. 2019.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto**: Relatório Técnico Final. São Paulo, 2005.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Proveniente de Aterro Sanitário**: Estudo de Caso. 2010. Disponível em: http://143.107.4.241/download/publicacoes/xiiicbe_aterro.pdf. Acesso em: 20 jan. 2019.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttn/catc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>. Acesso em: 10 Jan. 2019.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2012. Disponível em: [http://www.resol.com.br/cartilhas/aproveitamento_energetico_de_rsu_guia_feam_\(2\).pdf](http://www.resol.com.br/cartilhas/aproveitamento_energetico_de_rsu_guia_feam_(2).pdf). Acesso em: 25 nov. 2018.

FELCA, A. T. A.; GLÓRIA, R. F.; BARROS, R. M.; ALVES, A. P. Estimativa do potencial energético de um aterro sanitário por meio de duas metodologias. **Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas**, Poços de Caldas, 2015.

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Vérdi de. **Utilização do Biogás de Aterro Sanitário para a Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás**: Estudo de caso. 2007. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2007.

FLORES, Marcelo Costa. **Viabilidade econômica do biogás produzido por biodigestor para a produção de energia elétrica**: estudo de caso em confinador suíno. 2014. 84 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química), Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2014.

IBAM – Instituto brasileiro de administração municipal. **Gestão integrada de resíduos sólidos**: manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2018.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censos demográficos. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 13 de fev. 2019.

ICLEI - GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE (São Paulo) (Org.). **Manual para aproveitamento de biogás**: Volume I - Aterros Sanitários. 2009.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**: Relatório de Pesquisa. Brasília, 2012. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf. Acesso em: 20 Jan. 2019.

LISBOA, S.S.; HELLER, L.; SILVEIRA, R. B. Desafios do planejamento municipal de saneamento básico em municípios de pequeno porte: a percepção dos gestores. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 4, p.341-348, dez. 2013.

MARTINS, L. O. S.; SILVA, L. T.; DORES, D. O.; CARNEIRO, R. A. F. Potencial de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos visando o uso do biogás com fonte alternativa de energia renovável no estado da Bahia. **Convibra**, 2015.

MELLO, Alexandre da Silva. Desenvolvimento de equação para previsão da taxa de geração per capita de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo. 2014. 121f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental), Universidade de Ribeirão Preto, 2014.

MME. Ministério de Minas e Energia. PROINFA – **Programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica**. Apresentação do Departamento de Desenvolvimento Energético. Disponível em: <http://mme.gov.br>. Acesso em: 20 fev. 2019.

MOTAGNA, Bruna Tainara. **Biogás produzido em aterro sanitário com fonte de energia**: Uma revisão Bibliográfica. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Faculdade Educacional de Dois Vizinhos, União de Ensino do Sudoeste do Paraná, Dois Vizinhos, 2013.

NEGROMONTE, Maria Edith Diogo. **Gestão de Resíduos Sólidos**: o panorama atual no Estado de Pernambuco e o desafio da gestão integrada. 2002. 136 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Pública, Gestão Pública Para O Desenvolvimento do Nordeste), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.

OBLADEN N.L; OBLADEM N.T.R; BARROS K.R. **Guia para elaboração de Projetos de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos.** Curitiba, CREAPR, Vol III, 2009.

PMA - Prefeitura Municipal de Aracaju. Plano municipal integrado de saneamento básico, 2017

REIS, Bryzza Layanne Cavalcante. **Estudo de Caso: Aproveitamento energético do biogás de aterro do município de Barra do Garças-MT.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Especialização em projetos sustentáveis, mudanças climáticas e gestão corporativa de carbono), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RODRIGUES, Tatyane Souza Nunes. **Estudo de viabilidade do aproveitamento energético do biogás gerado em célula experimental no aterro controlado da Muribeca – Pernambuco.** 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

TANAKA, K.M.S.; LACERDA, L.A. **Geração de energia elétrica através do aproveitamento de gases provenientes de resíduos sólidos urbanos oriundos de aterros sanitários.** 2015. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.